

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 621.791.92

**КУРИЛЕНКО**  
**Артём Александрович**

**ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ  
ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКОЙ ПОРОШКОВ  
ОЛОВЯНИСТОЙ БРОНЗЫ С НАНОРАЗМЕРНЫМИ ДОБАВКАМИ  
КАРБИДА ТИТАНА И ОКСИДА АЛЮМИНИЯ**

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.02.07 – Технология и оборудование  
механической и физико-технической обработки

Минск 2018

Работа выполнена в Государственном научном учреждении «Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси»

Научный руководитель **БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ Марат Артемович**, доктор технических наук, доцент, заведующий лабораторией газотермических методов упрочнения деталей машин ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси»

Официальные оппоненты: **ЛАСКОВНЕВ Александр Петрович**, академик НАН Беларуси, доктор технических наук, академик-секретарь Отделения физико-технических наук Президиума НАН Беларуси;

**ВЕГЕРА Иван Иванович**, кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией технологий и оборудования индукционного нагрева ГНУ «Физико-технический институт НАН Беларуси»

Оппонирующая организация Государственное научное учреждение «Институт технологии металлов Национальной академии наук Беларуси»

Защита состоится «07» декабря 2018 года в 16<sup>00</sup> на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.03 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, Минск, проспект Независимости, 65, корпус 1, ауд. 202, телефон ученого секретаря: (+375 17) 292-24-04.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «   » \_\_\_\_\_ 2018 г.

Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций,  
доктор технических наук, профессор

О.Г. Девойно

© Курилёнок А.А., 2018  
© Белорусский национальный  
технический университет, 2018

## ВВЕДЕНИЕ

Надежность работы оборудования современного машиностроительного производства зависит от срока службы наиболее нагруженных узлов, к которым относятся такие подвижные сопряжения, как подшипники скольжения. При этом затраты на приобретение цветных металлов и сплавов, и изготовление из них подшипников скольжения, втулок поворотных устройств, вкладышей различных типов, для автотракторной техники, комбайнов, станочных систем, различного технологического оборудования на предприятиях Республики Беларусь составляют около 300 тыс. долл. США в год.

К настоящему времени накоплен значительный опыт успешного применения различных методов изготовления и восстановления деталей узлов трения скольжения с антифрикционными покрытиями, среди которых относительной простотой реализации, экономичностью, высокой прочностью сцепления с основой отличается центробежная индукционная наплавка. При этом используются различные антифрикционные сплавы, диспергированные до частиц средним размером от 0,2 до 1,5 мм. Как правило, обеспечение повышенных значений нагрузочной способности и износостойкости покрытий достигается за счет добавок в шихту специальных наполнителей, известных из технологий порошковой металлургии, однако на их применение в методах динамической наплавки накладывают ограничение реологические особенности расплавленной шихты. Так же получаемые покрытия не всегда удовлетворяют требованиям, предъявляемым к узлам трения деталей машин, к их эксплуатационным свойствам, износостойкости, экономичности и т.д.

Проведенный анализ методов получения антифрикционных покрытий показал, что перспективным представляется включение в состав покрытия высокотвердых керамических наночастиц тугоплавких соединений – карбидов, нитридов, оксидов, позволяющих достигать диспергирования структурных составляющих и равномерного их распределения. Использование наноразмерных добавок приводит к устранению несовершенств структуры в получаемых антифрикционных покрытиях и обеспечивает повышение уровня их эксплуатационных свойств, в том числе износостойкости, и микротвердости, и снижение коэффициента трения. Основной проблемой остается равномерное распределение наноразмерных добавок в объеме покрытия и способ их введения.

В связи с этим разработка технологии получения антифрикционных покрытий центробежной индукционной наплавкой порошковой шихты с наноразмерными добавками для деталей узлов трения машин является актуальной задачей, а ее решение важно, как для машиностроения, так и для других отраслей промышленности.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Связь работы с научными программами, темами

Исследования по теме диссертации выполнялись в ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси» в рамках следующих научно-

технических программ и заданий: ГНТП «Машиностроение», задания КТ-01.07 «Разработать и освоить производство карьерного самосвала грузоподъемностью 60 тонн с гидромеханической трансмиссией планетарного типа и ведущим мостом с усиленным дифференциалом, ресурсом не менее 750000 км пробега» (2011–2014 г.г., № ГР20120441); ГПНИ «Механика, техническая диагностика, металлургия», подпрограмма «Металлургия», задание 2.3.13 «Разработка метода индукционной наплавки антифрикционных и износостойких покрытий из композитных порошковых шихт с использованием активирующих наноразмерных добавок; порошковых композиций на основе отходов металлургических производств и технологического процесса их использования для восстановления деталей прокатного и волочильного оборудования; технологического процесса поверхностного упрочнения, обеспечивающего повышение эксплуатационного ресурса зубчатых передач трансмиссий машин» (2011–2015 г.г., № ГР20141742); ГПНИ «Механика, металлургия, диагностика в машиностроении», задания 2.3.03 «Исследование и моделирование влияния электромагнитного поля высокой частоты на температурные поля в металлах и сплавах при индукционной плавке, пайке и термообработке применительно к разработке новых ресурсосберегающих технологий и оборудования индукционной термообработки» (2016–2020 г.г.).

#### **Цель и задачи исследования**

Цель исследования – разработка технологии получения антифрикционных покрытий центробежной индукционной наплавкой порошков оловянистой бронзы с наноразмерными добавками карбида титана и оксида алюминия для деталей узлов трения машин.

Для достижения поставленной цели потребовалось решение следующих задач:

- разработать физико-математическую модель динамического воздействия расплава на наноразмерную частицу в процессе формирования покрытий центробежной индукционной наплавкой;

- изучить механизм введения наноразмерных тугоплавких добавок в наплавляемую порошковую шихту и определить состав порошковых шихт для получения покрытия с повышенными физико-механическими и триботехническими свойствами;

- исследовать влияние параметров центробежной индукционной наплавки на физико-механические свойства формируемых покрытий и определить диапазон оптимальных технологических параметров процесса;

- разработать технологический процесс формирования антифрикционных покрытий из порошков оловянистой бронзы с наноразмерными добавками карбида титана и оксида алюминия центробежной индукционной наплавкой и внедрить его в производство.

#### **Научная новизна**

1. Теоретически установлена и экспериментально подтверждена зависимость сил, действующих на наноразмерную частицу в жидком расплаве на стадии изотермической выдержки при центробежной индукционной наплавке,

от технологических параметров процесса и материалов покрытия, что позволило обеспечить пространственную стабилизацию в расплаве наноразмерных частиц и равномерность их распределения по объему покрытия.

2. На основании численного анализа тепловых процессов и определения полезной мощности передаваемой, на поверхность втулки, установлена длительность протекания реакции термического разложения гидроксида алюминия в зависимости от технологических параметров центробежной индукционной наплавки, что определило необходимые пределы электрических параметров используемых нагревательных элементов и возможные типы установок ТВЧ, а также размеры стальных заготовок и массу вводимых в шихту добавок.

3. Показано, что возможно получение наноразмерных частиц оксида алюминия из микроразмерных добавок гидроксида алюминия за счет их термического разложения непосредственно при центробежной индукционной наплавке антифрикционного покрытия, что позволило снизить эффект механолегирования, а также повысить износостойкость и уменьшить коэффициент трения покрытия.

4. Установлено, что модифицирование шихты из оловянистой бронзы наноразмерными добавками карбида титана и оксида алюминия, при центробежной индукционной наплавке покрытия, способствует уменьшению размеров зерен структуры и увеличению их количества, что обуславливает повышение микротвердости и износостойкости при одновременном снижении коэффициента трения покрытий.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Физико-математическая модель динамического воздействия расплава на частицы модификатора в процессе формирования покрытий с наноразмерными добавками центробежной индукционной наплавкой на стадии изотермической выдержки, учитывающая баланс силы тяжести, гидростатической силы выталкивания, центробежной и силы вязкого сопротивления среды, позволившая установить диапазон технологических параметров, обеспечивающих пространственную стабилизацию в расплаве наноразмерных частиц и равномерность их распределения по объему покрытия.

2. Результаты численного анализа тепловых процессов, проходящих в системе «втулка – наплавляемый материал» и определение полезной мощности, передаваемой на поверхность втулки, в зависимости от параметров нагревательной установки, позволившие установить возможность синтеза наноразмерных частиц оксида алюминия из микроразмерных частиц гидроксида алюминия, и выполнить расчет длительности протекания реакции с учетом массы вводимых в шихту добавок, частоты тока, мощности нагревательного элемента, размеров стальной основы, при центробежной индукционной наплавке покрытия.

3. Результаты экспериментального исследования влияния состава шихты, содержащей гидроксид алюминия, и кинетики нагрева, на физико-механические свойства покрытий, позволившие установить необходимые температурно-временные параметры для осуществления процесса термического

разложения гидроксида алюминия в наноразмерный оксид алюминия при центробежной индукционной наплавке, и количество микроразмерной добавки гидроксида алюминия, обеспечивающее максимальное повышение физико-механических и триботехнических свойства покрытий.

4. Результаты исследования влияния на физико-механические свойства антифрикционных покрытий с наноразмерными добавками режимов предварительной обработки бронзового порошка, позволившие установить, что при введении в бронзовую шихту наноразмерной добавки из карбида титана и оксида алюминия, наилучший результат достигается после предварительной обработки шихты, нагреве бронзового порошка с последующим резким охлаждением, для получения более рельефной поверхности и появления микро-трещин на бронзовых частицах, которые способствуют равномерному распределению в шихте наноразмерных частиц, а также повышают их сцепляемость с бронзовыми частицами, повышая физико-механические свойства наплавленных антифрикционных покрытий.

5. Результаты экспериментальных исследований, устанавливающих связь основных технологических параметров (температура изотермической выдержки, продолжительность выдержки, частота вращения детали) процесса центробежной индукционной наплавки с величиной интенсивности изнашивания покрытий, позволившие с использованием метода математического планирования осуществить обоснованный выбор режимов, обеспечивающий снижение интенсивности изнашивания покрытия, и разработки технологического процесса нанесения антифрикционных покрытий методом центробежной индукционной наплавки.

#### **Личный вклад соискателя ученой степени**

Автор принимал непосредственное участие в постановке задач исследования, проведении экспериментов, обработке и анализе полученных результатов, в подготовке совместных публикаций и научных докладов на конференциях и симпозиумах.

Белоцерковский М.А. – научный руководитель, сформулировал цель и задачи исследований, оказывал консультационную и практическую помощь на всех этапах выполнения настоящей работы. Сосновский И.А. оказывал консультативное и практическое содействие при изготовлении экспериментальных образцов, определении параметров наплавки, подбору порошковых шихт и модификаторов. Комарова В.И. и Комаров А.И. оказывали консультативное и практическое содействие при проведении триботехнических испытаний, рентгенофазового и металлографического анализа, измерении микротвердости и расшифровке полученных данных. Сосновский А.В. оказывали консультативное и практическое содействие.

#### **Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов**

Материалы диссертационного исследования были доложены на следующих конференциях и симпозиумах: «Материалы оборудование и ресурсосберегающие технологии» (Могилев, 2014, 2015 гг.); «Технология. Оборудование. Качество» (Минск, 2014, 2015, 2018 гг.); «Новые материалы и технологии: по-

рошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка» (Минск, 2014 г.); «Современные методы и технологии создания и обработки материалов» (Минск, 2014 г.); «Инновации в машиностроении – 2014» (Минск, 2014 г.); «Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении» (Минск, 2016, 2017 гг.); «Инновационные технологии в машиностроении: материалы международной научно-технической конференции» (Новополоцк, 2018).

По результатам проведенных исследований разработан технологический процесс ТД ИЯМБ 01.07.01.07.000 индукционной наплавки антифрикционных покрытий на высоконагруженные втулки сателлитов дифференциалов гидродинамической трансмиссии карьерного самосвала БелАЗ. Технологический процесс внедрен на ОАО «БЕЛАЗ» – управляющей компанией холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ». Разработаны технологические рекомендации № ТР 1/01.07 – 2014 по нанесению антифрикционных покрытий на высоконагруженные втулки сателлитов дифференциалов гидродинамической трансмиссии карьерного самосвала БелАЗ. Ожидаемая экономия на одной детали составит 17,5 руб.

Показана возможность использования разработанного способа формирования антифрикционного покрытия из порошковых материалов, содержащих в своем составе наноразмерные добавки карбида титана  $TiC$  и оксида алюминия  $\alpha-Al_2O_3$ , для повышения износостойкости, микротвердости и снижения коэффициента трения по сравнению с немодифицированным покрытием, в ремонтных подразделениях машиностроительной отрасли (ЭРУП «Центр механизации путевых работ Белорусской железной дороги»). Установлено, что срок службы деталей с покрытиями в 1,25–1,33 раза выше, чем у серийных деталей. Ожидаемая экономия на одной детали составит 4,08 руб.

#### **Опубликование результатов диссертации**

По результатам исследований опубликована 25 научных работ, в том числе: 15 статей в изданиях, входящих в Перечень ВАК Республики Беларусь объемом 10,9 авторских листа; 7 статей в сборниках материалов конференций; 2 патента Республики Беларусь; подана 1 заявка на изобретение.

#### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, 5 глав, заключения, библиографического списка и приложений. Работа содержит 108 страниц, в том числе 79 страниц машинописного текста, 36 иллюстраций, 11 таблиц, 13 страниц библиографического списка (144 наименования, из них 25 публикаций соискателя), 29 страниц приложений.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении и общей характеристике работы** обоснована актуальность исследований, изложена краткая характеристика диссертационной работы, сформулированы ее тема и цель, показана связь с крупными научными программами, приведены положения, выносимые на защиту, охарактеризована значимость полученных результатов.

**В первой главе** представлен анализ литературных данных, посвященных технологиям формирования покрытий из порошковых шихт.

Показано, что наиболее экономичным и простым в реализации методом нанесения антифрикционных покрытий на внутренние поверхности вкладышей подшипников скольжения, втулок поворотных устройств и других осесимметричных деталей трибосопряжений, имеющих внутренние полости, является центробежная индукционная наплавка.

Охарактеризованы физико-химические основы процессов формирования наплавляемых слоев и показано влияние температурно-временных условий нанесения на основные технологические свойства покрытий. Выявлены недостатки процесса центробежной индукционной наплавки порошковых шихт.

Показано, что одним из возможных и эффективных путей повышения триботехнических свойств наносимых покрытий является введение в шихту наноразмерных модификаторов, обуславливающих протекание необходимых фазово-структурных превращений.

Отмечена необходимость разработки методов, позволяющих не только вводить наноразмерные добавки в состав шихты наплавляемой центробежным методом, но и формировать их непосредственно в процессе наплавки. На основании анализа научно-технической литературы сформулированы цель и определены задачи диссертационной работы.

**Во второй главе** рассмотрены используемые материалы и методики исследования. Поскольку среди антифрикционных материалов наиболее широкое распространение получили медные сплавы в виде латуней и бронз, в качестве основного компонента шихты использовался порошок бронзы БрОФ10-1 состава: Cu – 86,9–90,6 %; Sn – 9–11 %; P – 0,4–1,1 %; примеси – 1 %, с размером сферических частиц в диапазоне 240–315 мкм ГОСТ 28377-89.

Для модифицирования бронзового порошка использовали гидроксид алюминия  $\gamma\text{-Al}(\text{OH})_3$ , который при температурах ниже температуры наплавки разлагается до наноразмерного тугоплавкого оксида алюминия, а также обладает невысокой стоимостью и легкодоступностью. Кроме это использовали наноразмерные частицы тугоплавких соединений карбида титана TiC и оксида алюминия  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , синтезированные методом газофазного осаждения в восстановительной атмосфере аммиака и водорода.

Центробежная индукционная наплавка осуществлялась на оборудовании, включающем генератор токов высокой частоты (ТВЧ) типа ЛПЗ-2-67М, мощностью 60 кВт, частотой 66 кГц, рамочный индуктор, программный регулятор ТРМ 151 (ООО «Овен»), оптический пирометр TemPro-2200 и установку центробежной индукционной наплавки (конструкции ОИМ НАН Беларуси) с регулируемой частотой вращения до 3000 об/мин. Температура нагрева контролировалось пирометром TemPro-2200, время нагрева контролировалось электронным секундомером ИВПр-203М ТУ 4282-001-33865949-2009. При наплавке шихта размещалась в полости стальной втулки, изготовленной из стали 20 (ГОСТ 1050-88). После наплавки, втулки с покрытиями подверглись механической обработки.



Структурно-фазовое состояние покрытий исследовалось методами рентгеноструктурного, металлографического и дюрометрического анализов. Рентгенодифрактометрические исследования, включающие рентгенофазовый анализ (РФА), проводились на автоматизированном рентгеновском комплексе, на базе дифрактометра ДРОН-3М в СоКа-излучении. Морфология поверхности образцов покрытия изучалась металлографическим анализом на микроскопе МИМ-8, обеспечивающим цифровую регистрацию изображений. Триботехнические испытания выполнялись на призматических образцах размером  $10 \times 6 \times 6$  мм в режиме граничного трения на трибометре МТВП-2 в среде синтетического масла 10W-40 по схеме возвратно поступательного скольжения контртела (материал Сталь 65Г) относительно неподвижного образца,  $v = 0,1$  м/с,  $p = 30, 50, 70$  МПа. Микротвердость определялась на приборе ПМТ-3 при нагрузке на индентор 0,2 и 0,5 Н.

**В третьей главе** сформулированы основные требования к процессу центробежной индукционной наплавки и используемым при этом материалам для обеспечения высокого качества антифрикционных покрытий, содержащих наноразмерные добавки. Выполнено физико-математическое моделирование динамического воздействия расплава на частицы модификатора в процессе формирования покрытий с наноразмерными добавками центробежной индукционной наплавкой, с учетом сил, действующих на наноразмерную частицу, при изотермической выдержке.

Использовавшиеся ранее модели процесса центробежной индукционной наплавки не позволяют оценить влияние наноразмерных добавок на процесс формирования покрытия. В связи с этим при моделировании рассматривался процесс индукционной центробежной наплавки покрытия с наноразмерными добавками на цилиндрической заготовке в момент изотермической выдержки, когда расплавленный металл образует сплошное кольцо покрытия на внутренней поверхности заготовки.

На погруженную в жидкий металл наноразмерную частицу действуют различные силы, смещающие ее от своего первоначального месторасположения, что влечет трудности с равномерным распределением наноразмерных частиц в расплаве. Поэтому, для определения того, что происходит с частицами, рассмотрели действующие на нее силы.

Тело, погруженное в жидкость и вращающееся вместе с нею, находится под действием силы гидростатического давления, направленной к оси вращения и равной центробежной силе, развиваемой вытесненным объемом жидкости, откуда получаем, что подъемная сила равна:

$$F_{под} = V \cdot \omega^2 R' \cdot (\rho_в - \rho_м); \quad (1)$$

$$R' = \sqrt{\frac{2}{5}} R, \quad (2)$$

где  $F_{под}$  – подъемная сила, действующая на частицу, погруженную в жидкий металл, Н;  $V$  – объем частицы, погруженной в жидкий металл, м<sup>3</sup>;  $\rho_в$  – плот-

ность материала частицы,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\rho_m$  – плотность жидкого металла,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\omega$  – угловая скорость,  $\text{рад/с}$ ;  $R'$  – радиус центра сил инерции частицы, м;  $R$  – внутренний радиус цилиндрической заготовки, м.

Сила лобового сопротивления, действующая на сферические объекты с очень маленькими числами Рейнольдса, в непрерывной вязкой жидкости:

$$F_{\text{сопр}} = 6\pi \cdot r_g \eta \cdot v, \quad (3)$$

где  $F_{\text{сопр}}$  – сила гидродинамического сопротивления, Н;  $r_g$  – радиус частицы, м;  $\eta$  – вязкость жидкого металла,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ ;  $v$  – скорость частицы,  $\text{м/с}$ .

$$v = \frac{d^2 \omega^2 R' (\rho_g - \rho_m)}{18\eta}, \quad (4)$$

где  $d$  – диаметр частицы, м.

Уравнения для остальных сил, действующих на наноразмерную частицу в процессе индукционной центробежной наплавки:

$$F_m = mg; \quad (5)$$

$$F_{\text{ц}} = m \cdot \omega^2 R, \quad (6)$$

где  $F_{\text{нод}}$  – сила тяжести, Н;  $m$  – масса частицы, кг;  $g$  – ускорение свободного падения,  $9,8067 \text{ м/с}^2$ ;  $F_{\text{ц}}$  – центробежная сила, Н;  $\omega$  – угловая скорость заготовки,  $\text{рад/с}$ ;  $R$  – внутренний радиус цилиндрической заготовки, м.

Основной задачей расчета являлось обеспечение стабильности свойств и надлежащего уровня качества покрытий с наноразмерными добавками, за счет их равномерного распределения в объеме покрытия. В рассматриваемом процессе, седиментация наноразмерных частиц в наплавляемых слоях проходит под действием описанных выше сил. В связи с этим были подобраны режимы индукционной наплавки, размеры детали, свойства наплавляемых материалов, чтобы уравновесить силы, действующие на наноразмерную частицу.

Был выполнен оценочный расчет действующих на частицу сил учитывая экспериментальные исследования. В качестве наноразмерной добавки использован TiC, плотность которого  $\rho_g = 4930 \text{ кг/м}^3$ , радиус частицы  $r_g = 20 \cdot 10^{-9} \text{ м}$ , угловая скорость заготовки  $\omega = 157,096 \text{ рад/с}$  (1500 об/мин), внутренний радиус цилиндрической заготовки  $R = 0,05 \text{ м}$ . Материал покрытия БрОФ10-1, для жидкофазных бронзовых сплавов плотность  $\rho_m = 8300\text{--}8900 \text{ кг/м}^3$ , и динамическая вязкость  $\eta = 0,0033 \text{ Па}\cdot\text{с}$  (при температуре  $1100\text{--}1200 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Составив уравнение, действующих на частицу сил, в зависимости от их направления, и подставив численные значения, получили, что действующие на частицу силы в левой и правой части приблизительно равны.

$$F_{\text{нод}} + F_{\text{сопр}} = F_m + F_{\text{ц}}; 1,9714 \cdot 10^{-16} \approx 2,0543 \cdot 10^{-16}.$$

Отсюда следует, что перемещение наноразмерной частицы в жидком металле крайне маловероятно.

Таким образом, становится возможным подобрать материал и режимы индукционной центробежной наплавки, при использовании которых смещение наноразмерных частиц от своего первоначального месторасположения будет

незначительным и можно считать, что наноразмерные добавки в расплаве распределены равномерно. Это обеспечит стабильность свойств покрытия по всему его объему и надлежащий уровень качества покрытий. Кроме этого расчет позволяет подбирать режимы наплавки для целенаправленного смещения наноразмерных добавок в необходимых пределах. Для упрощения расчетов и большей наглядности численной оценки, определили скорость смещения наноразмерных частиц при изотермической выдержке при индукционной центробежной наплавке покрытия:

$$v = \frac{2 \cdot r_e^2}{9 \cdot \eta} \cdot \left( \rho_e \cdot g + \omega^2 (R \cdot \rho_e - R' \cdot (\rho_e - \rho_m)) \right), \quad (7)$$

где  $v$  – скорость частицы, м/с;  $r_e$  – радиус частицы, м;  $\eta$  – вязкость жидкого металла, Па·с;  $\rho_e$  – плотность материала частицы, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_m$  – плотность жидкого металла, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения м/с<sup>2</sup>;  $\omega$  – угловая скорость, рад/с;  $R$  – внутренний радиус цилиндрической заготовки, м;  $R'$  – радиус центра сил инерции частицы, м.

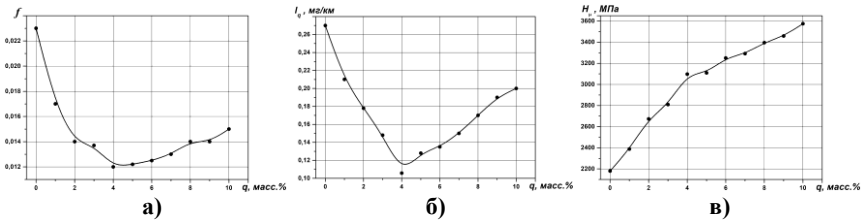
Построенная физико-математическая модель процесса формирования покрытий с наноразмерными добавками центробежной индукционной наплавкой позволяет подобрать материалы и технологические режимы, сводящие к минимуму в условиях действия центробежных сил неоднородность концентрации частиц упрочняющей фазы и наноразмерных частиц в покрытии. Либо, в зависимости от поставленной задачи, модель позволит подобрать режимы наплавки для целенаправленного смещения наноразмерных частиц в необходимых нам пределах.

Одним из возможных технологических вариантов введения наноразмерных добавок является их синтез из микроразмерных частиц наполнителя в процессе индукционной наплавки покрытия. Расчет скорости нагрева и времени наплавки производился с учетом общей массы введенных частиц, а также типа и скорости протекания химической реакции с использованием формул превращения. Реакция в суммарном виде представляет собой следующее уравнение:  $2\text{Al}(\text{OH})_3(\text{тв.}) \rightarrow \gamma\text{-Al}_2\text{O}_3(\text{тв.}) + 3\text{H}_2\text{O}(\text{г.})\uparrow$ . В результате теоретических исследований расчета времени синтеза наноразмерных частиц оксида алюминия, были определены суммарная тепловая энергии и полезная мощности на поверхности детали, что позволило установить длительность протекания реакции с учетом массы вводимых в шихту добавок, частоты тока установки, мощности нагревательного элемента и размеров стальной основы. Установлено, что при наплавке покрытия на стальную основу из бронзовой шихты с добавкой 4 масс.% гидроксида алюминия  $\gamma\text{-Al}(\text{OH})_3$ , реакция термического разложения проходит при температуре 500 °С за 7 секунд, что позволило установить технологические параметры процесса наплавки.

**В четвертой главе** выполнены экспериментальные исследования влияния микроразмерной добавки гидроксида алюминия на формирование покрытий индукционной центробежной наплавкой, позволившие установить, что наилучшие свойства покрытий из оловянистой бронзы достигаются за счет

осуществления двухстадийной индукционной наплавки с выдержкой на первой стадии, необходимой для осуществления процесса термического разложения гидроксида алюминия в наноразмерный оксид алюминия, протекающего при температуре 500 °С.

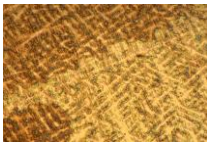
Для определения необходимого количества гидроксида алюминия  $\gamma$ -Al(OH)<sub>3</sub> в составе шихты, были проведены исследования свойств покрытий с различным количеством добавок (рисунок 1). Бронзовую шихту смачивали водной суспензией, содержащей микроразмерный гидроксид алюминия и осуществляли процесс центробежной индукционной наплавки в две стадии. На первой стадии производился нагрев заготовки до температуры 500 °С с последующей изотермической выдержкой при этой температуре. На второй стадии осуществлялся нагрев заготовки до температуры 1100 °С обеспечивающей наплавку шихты с изотермической выдержкой при этой температуре.



**Рисунок 1. – Зависимость дюрометрических и триботехнических характеристик покрытий от количества масс.% Al(OH)<sub>3</sub>: а) коэффициента трения покрытия; б) интенсивности изнашивания; в) микротвердости**

Микротвердость покрытий возрастает с увеличением количества гидроксида алюминия  $\gamma$ -Al(OH)<sub>3</sub> в наплавляемой шихте (рисунок 1), коэффициент трения и интенсивность изнашивания покрытия постепенно снижаются до минимального значения при количестве гидроксида алюминия 4 масс.%.

Металлографический анализ показал (рисунок 2), что на структурах модифицированных 2 масс.%  $\gamma$ -Al(OH)<sub>3</sub> наблюдается преобразование дендритной структуры в структуру с равноосными зёрнами, на структурах модифицированных 4 масс.%  $\gamma$ -Al(OH)<sub>3</sub> наблюдается уменьшение геометрических размеров дендритной структуры и зёрна обладают более округлыми формами.



x200

а)



x200

б)



x200

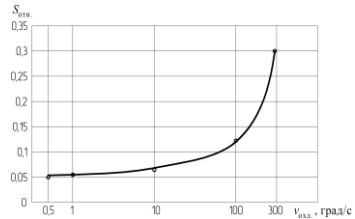
в)

**Рисунок 2. – Структура поверхности покрытий из БрОФ 10-1 без добавок (а), с добавкой 2 масс.%  $\gamma$ -Al(OH)<sub>3</sub> (б), с добавкой 4 масс.%  $\gamma$ -Al(OH)<sub>3</sub> (в)**

Таким образом, содержание в шихте гидроксида алюминия  $\gamma\text{-Al(OH)}_3$  менее 2 масс.% привело к незначительным улучшениям механических и триботехнических свойств покрытия, микротвердость увеличилась в 1,23 раза, интенсивность изнашивания уменьшилась в 1,56 раза, коэффициент трения уменьшился в 1,64 раза. В свою очередь содержание в шихте гидроксида алюминия  $\gamma\text{-Al(OH)}_3$  равное 4 масс.% позволило увеличить микротвердость в 1,4 раза, уменьшить интенсивность изнашивания в 2,62 раза и коэффициент трения в 2,1 раза.

Разработана технология получения антифрикционных покрытий центробежной индукционной наплавкой порошков оловянистой бронзы с наноразмерными добавками оксида алюминия и карбида титана, позволяющая повысить качество наносимого покрытия – увеличить показатели твердости и улучшить триботехнические свойства, улучшить сцепляемость порошковой шихты с наноразмерными добавками и обеспечить их равномерное распределение в составе покрытия. Получение антифрикционного покрытия, при использовании разработанной технологии включает предварительную подготовку шихты – нагрев бронзового порошка до температуры 200–300 °С с последующим резким охлаждением со скоростью  $(0,3\text{--}0,5) \cdot 10^3$  град/с, для получения более рельефной поверхности и формирования микротрещин на бронзовых частицах. Относительная площадь трещин на поверхности частиц  $S_{\text{отн}}$  значительно возрастает при увеличении скорости охлаждения бронзового порошка  $v_{\text{охл}}$  до 300 град/с (рисунок 3).

После предварительной обработки шихты, полученный порошок оловянистой бронзы смешивали с наноразмерными частицами TiC и  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  (4 % массы шихты) механохимическим методом для получения шихты для наплавки. Затем в шихту добавляли порошки флюсующих материалов, криолит, перемешивали и размещали во внутренней поверхности втулки, осуществляли ее центробежное формование на установке, и нагрев токами высокой частоты до температуры 1100 °С, обеспечивающей наплавку шихты, и изотермическую выдержку при этой температуре.

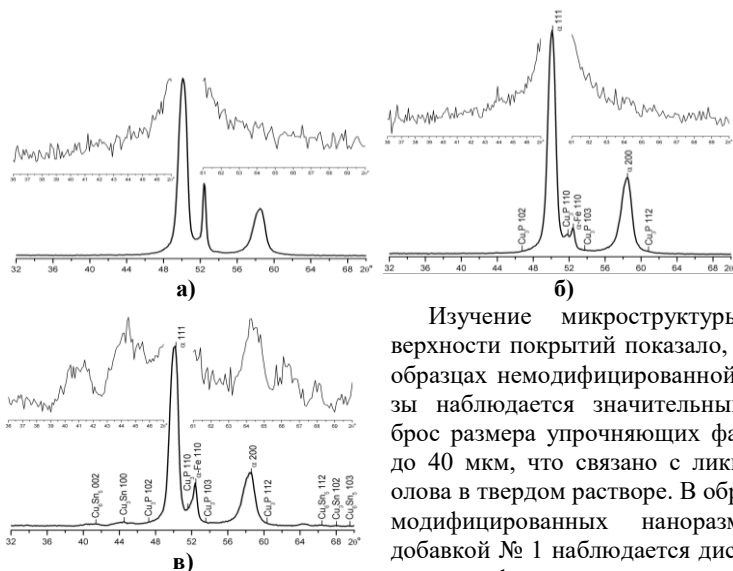


**Рисунок 3. – Зависимость относительной площади трещин на поверхности частиц от скорости охлаждения**

Таблица 1. – Состав наноразмерной добавки, массовая доля в шихте Q %

| № | Состав   | Q, % |                                |      |
|---|--|------|--------------------------------|------|
|   |  | TiC  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | BN   |
| 1 | 26 % TiC – 35 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – 16 % BN | 1,02 | 1,37                           | 0,39 |
| 2 | 30 % TiC – 45 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>           | 1,18 | 1,77                           | –    |

Установлено (рисунок 4), что керамические тугоплавкие наноразмерные частицы карбида титана  $TiC$  и оксида алюминия  $\alpha-Al_2O_3$ , выступая в роли центров кристаллизации, способствуют образованию фосфида меди ( $Cu_3P$ ) фаз  $Cu_3Sn$ ,  $Cu_6Sn_5$ , которые в образцах немодифицированных покрытий не обнаружены.



**Рисунок 4. – Дифрактограмма образцов покрытия из бронзы БрОФ10-1 (а), с наноразмерной добавкой № 1 (б), с добавкой № 2 (в)**

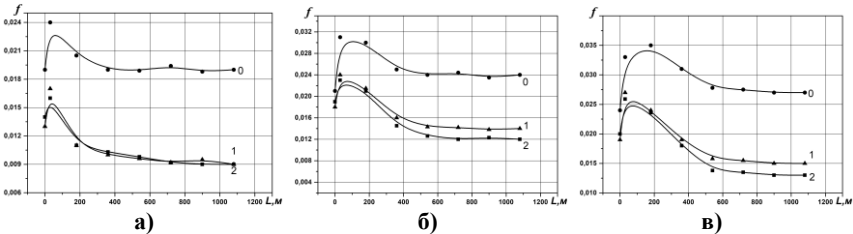
Изучение микроструктуры поверхности покрытий показало, что на образцах немодифицированной бронзы наблюдается значительный разброс размера упрочняющих фаз от 2 до 40 мкм, что связано с ликвацией олова в твердом растворе. В образцах, модифицированных наноразмерной добавкой № 1 наблюдается диспергирование фаз эвтектоида, тенденция расположения частиц фаз вдоль границ зерен  $\alpha$ -фазы. В образцах, модифицированных наноразмерной добавкой № 2 наблюдается резкое изменение

структуры, бронза имеет полиэдрическое строение.

Изучение микроструктуры поверхности покрытий показало, что на образцах немодифицированной бронзы наблюдается значительный разброс размера упрочняющих фаз от 2 до 40 мкм, что связано с ликвацией олова в твердом растворе. В образцах, модифицированных наноразмерной добавкой № 1 наблюдается диспергирование фаз эвтектоида, тенденция расположения частиц фаз вдоль границ зерен  $\alpha$ -фазы. В образцах, модифицированных наноразмерной добавкой № 2 наблюдается резкое изменение структуры, бронза имеет полиэдрическое строение.

Анализ результатов исследований дюрOMETрических и триботехнических характеристик наплавленных покрытий (рисунок 5, таблица 2) показал, что, введение наноразмерных добавок карбида титана и оксида алюминия в количестве 4 масс.% в порошковую шихту оловянистой бронзы приводит к ее фазово-структурным превращениям и повышению износостойкости в 3,05–3,2

раза, микротвердости в 1,3–1,4 раза при одновременном снижении коэффициента трения в зависимости от приложенной нагрузки в 2,11 раза при 30 МПа, в 1,71–2 раза при 50 МПа, в 1,8–2,1 раза при 70 МПа по сравнению с немодифицированным покрытием.



**Рисунок 5. – Зависимость коэффициента трения от продолжительности испытаний при различных нагрузках: а) – 30 МПа, б) – 50 МПа, в) – 70 МПа образцов немодифицированной бронзы (0), модифицированной наноразмерной добавкой № 1 (1), наноразмерной добавкой № 2 (2)**

**Таблица 2. – Механические и триботехнические свойства покрытий**

| Исследуемые свойства                                 |                 | Бронза БрОФ10-1 | Бронза + добавка № 1 | Бронза + добавка № 2 |
|--|-----------------|-----------------|----------------------|----------------------|
| Микротвердость $H_n$                                 | до испытаний    | 2115            | 2957                 | 2941                 |
|  | после испытаний | 2342            | 3292                 | 3040                 |
| Интенсивность изнашивания $I_a \cdot 10^{-5}$ , мг/м |                 | 27,7            | 9,08                 | 8,67                 |
| Коэффициент трения $f$                               | 30 МПа          | 0,019           | 0,009                | 0,009                |
|  | 50 МПа          | 0,024           | 0,014                | 0,012                |
|  | 70 МПа          | 0,027           | 0,015                | 0,013                |

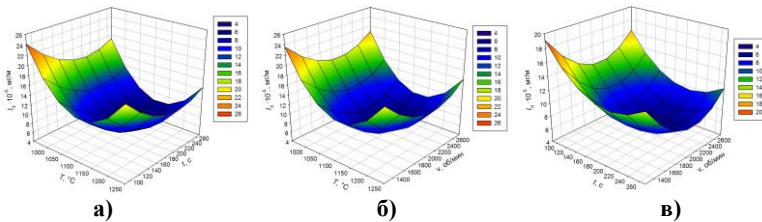
Триботехническими испытаниями установлено (таблица 2), что с увеличением нагрузки происходит увеличения коэффициента трения, причем для покрытий с наноразмерной добавкой состава № 1 коэффициент трения увеличивается в 1,66 раза, а для покрытий с наноразмерной добавкой № 2 увеличивается в 1,44 раза. Отмечено что абсолютные значения коэффициента трения у модифицированных покрытий значительно ниже чем у покрытий из немодифицированной бронзы.

В результате исследования полученных антифрикционных покрытий показано, что введенный наноразмерный модификатор в количестве 4 масс.% в порошковую шихту оловянистой бронзы приводит к ее фазово-структурным превращениям. Соединения меди с оловом  $Cu_6Sn_5$  (эвтектид  $\alpha+Cu_6Sn_5$ ) обеспечивают высокие антифрикционные свойства бронзы, фосфид  $Cu_3P$  улучшает литейные свойства, повышает твердость, прочность, износостойкость, упругие и антифрикционные свойства. Кроме того, возможно прямое включение наноразмерных частиц  $TiC$  и  $\alpha-Al_2O_3$  или продуктов их фазово-структурного превращения в структуру бронзы.

В пятой главе выполнена оптимизация процесса центробежной индукционной наплавки антифрикционных покрытий, проведенная с использованием методов математического планирования эксперимента. Были обоснованы технологические режимы, обеспечивающие оптимальную интенсивность изнашивания материала покрытия  $I_q$ . Варьируемые факторы:  $T$  – температура изотермической выдержки;  $t$  – время изотермической выдержки;  $\nu$  – частота вращения детали. В результате получено следующее уравнение регрессии:

$$I_q \cdot 10^{-5} = 540,39 - 0,85173 \cdot T - 0,20372 \cdot t - 0,03387 \cdot \nu + 0,00038 \cdot T^2 + 0,00049 \cdot t^2 + 0,000008 \cdot \nu^2.$$

Используя уравнение, были построены графические зависимости интенсивности изнашивания от исследуемых факторов (рисунок 6).



**Рисунок 6.** – Зависимость интенсивности изнашивания  $I_q$  от: а) температуры изотермической выдержки  $T$  и времени выдержки  $t$  ( $\nu = 2000$  об/мин); б) температуры  $T$  и частоты вращения детали  $\nu$  ( $t = 180$  с); в) времени изотермической выдержки  $t$  и частоты вращения детали  $\nu$  ( $T = 1100$  °С)

Определена область значений технологических режимов для получения минимальной интенсивности изнашивания материала покрытия (температура изотермической выдержки  $T = 1100$ – $1150$  °С, время изотермической выдержки  $t = 180$ – $240$  с, частота вращения детали  $\nu = 2000$ – $2250$  об/мин).

На основании проведенных исследований разработан технологический процесс ТД ИЯБМ 01.07.01.07.000 индукционной наплавки антифрикционных покрытий на высоконагруженные втулки сателлитов дифференциалов гидродинамической трансмиссии карьерного самосвала БЕЛАЗ. Процесс и технологические рекомендации по его реализации № ТР 1/01.07 – 2014 внедрены на ОАО «БЕЛАЗ» – управляющей компанией холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ».

Сравнительные испытания серийно изготовленных деталей на ЭРУП «Центр механизации путевых работ Белорусской железной дороги» с биметаллическими деталями из составов антифрикционных материалов повышенной износостойкости, включающих бронзовый порошковый материал марки БрОФ10-1 в сочетании с наноразмерными добавками карбида титана TiC и оксида алюминия  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, показали, что срок службы деталей с покрытиями в 1,25–1,33 раза выше, чем у серийных деталей.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Основные научные результаты диссертации

В ходе выполнения диссертационного исследования получены нижеследующие научные результаты.

1. Разработана физико-математическое модель динамического воздействия расплава на частицы модификатора в процессе формирования покрытий с наноразмерными добавками центробежной индукционной наплавкой, с учетом сил, действующих на наноразмерную частицу, при изотермической выдержке. В результате моделирования установлено, что действующие на частицу силы, поднимающие ее к свободной поверхности расплава и опускающие ее к стальной основе приблизительно равны, при использовании следующих данных: материал покрытия БрОФ10-1, наноразмерная добавка TiC с радиусом частиц  $r_e = 20 \cdot 10^{-9}$  м, угловая скорость заготовки  $\omega = 157,096$  рад/с (1500 об/мин), внутренний радиус цилиндрической заготовки  $R = 0,05$  м. Разработанная модель определяет технологические параметры наплавки, позволяющие обеспечить пространственную стабилизацию в расплаве наноразмерных частиц и равномерность их распределения по объему покрытия. На базе выполненного моделирования процесса формирования покрытий установлено, что при внутреннем радиусе цилиндрической заготовки  $R = 0,05$  м, для частиц TiC размером  $r_a = 20$  нм, при угловой скорости  $n = 1000$  об/мин, скорость перемещения частицы составляет  $v = 38$  нм/с [3, 8, 16, 17, 19].

2. В результате численного анализа тепловых процессов, проходящих в системе «втулка – наплавляемый материал» и определении полезной мощности, передаваемой на поверхность втулки, в зависимости от параметров нагревательной установки, теоретически показана возможность синтеза наноразмерных частиц оксида алюминия из микроразмерных частиц гидроксида алюминия. Установлена длительность протекания реакции с учетом массы вводимых в шихту добавок, частоты тока, мощности нагревательного элемента и размеров стальной основы, при центробежной индукционной наплавке покрытия. Показано, что при температуре выдержки  $T = 500$  °С, массе вводимых в шихту добавок  $m_c = 10$  г, частоте тока установки  $f = 66000$  Гц, мощности нагревательного элемента  $P_r = 60$  кВт, наружном диаметре стальной заготовки  $D_2 = 0,065$  м, реакция термического разложения проходит за 7 секунд [4, 18, 21, 22, 24].

3. В результате экспериментальных исследований изменения физико-механических свойств наплавленных антифрикционных покрытий в зависимости от количества микроразмерной добавки гидроксида алюминия в бронзовой шихте и кинетике нагрева, установлено, что наилучший результат достигается при двухстадийной наплавке, – нагреве на первой стадии до температуры 500 °С и изотермической выдержке при этой температуре, необходимой для осуществления процесса термического разложения гидроксида алюминия в наноразмерный оксид алюминия, с последующим нагревом на второй стадии до температуры 1100 °С и изотермической выдержке при этой температуре, и содержании в шихте оловянистой бронзы 4 масс.% гидроксида алюминия, что позволило увеличить микротвердость в 1,4 раза, уменьшить интенсивность

изнашивания в 2,62 раза и коэффициент трения в 2,1 раза по сравнению с покрытием без добавок [2, 5, 9, 10, 11].

4. В результате экспериментальных исследований характера изменений физико-механических свойств наплавленных антифрикционных покрытий с наноразмерными добавками в зависимости от режимов предварительной термической обработки бронзового порошка перед операцией индукционной наплавки, установлено, что при введении в бронзовую шихту наноразмерной добавки из карбида титана и оксида алюминия, наилучший результат достигается после предварительной обработки шихты, нагреве бронзового порошка до температуры 200–300 °С с последующим резким охлаждением со скоростью  $(0,3–0,5) \cdot 10^3$  град/с. Показано, что на поверхности бронзовых частиц появляются микротрещины, которые способствуют равномерному распределению в шихте наноразмерных частиц, а также повышают их сцепляемость с бронзовыми частицами, так введенная наноразмерная добавка в количестве 4 масс.%, в порошковую шихту оловянистой бронзы, выступая в роли центров кристаллизации, способствуют образованию фосфида меди ( $\text{Cu}_3\text{P}$ ), фаз  $\text{Cu}_3\text{Sn}$ ,  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$ , обуславливающих повышение износостойкости в 3,05–3,2 раза, микротвердости в 1,3–1,4 раза при одновременном снижении коэффициента трения в зависимости от приложенной нагрузки в 2,11 раза при 30 МПа, в 1,71–2 раза при 50 МПа, в 1,8–2,1 раза при 70 МПа по сравнению с покрытием без добавок [6, 12, 20, 25].

5. В результате экспериментальных исследований влияния основных технологических параметров (температура изотермической выдержки, продолжительность выдержки, частота вращения детали) процесса центробежной индукционной наплавки на величину интенсивности изнашивания покрытий, с использованием метода математического планирования эксперимента установлено, что оптимальный диапазон режимов находится в пределах: температура изотермической выдержки  $T = 1100–1150$  °С, время изотермической выдержки  $t = 180–240$  с, частота вращения детали  $\nu = 2000–2250$  об/мин, что обеспечило снижение интенсивности изнашивания в 3,90–4,35 раза [1, 7, 13, 14, 15, 23].

#### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

1. На базе исследований получены инженерные решения, защищенные патентом на изобретение РБ № 21351 Способ нанесения антифрикционного покрытия на внутреннюю поверхность детали типа тела вращения, а также Евразийская заявка на изобретение № 201600519 Способ формирования антифрикционного покрытия из порошковых материалов.

2. По результатам проведенных исследований разработан технологический процесс ТД ИЯМБ 01.07.01.07.000 индукционной наплавки антифрикционных покрытий на высоконагруженные втулки сателлитов дифференциалов гидродинамической трансмиссии карьерного самосвала БелАЗ. Технологический процесс внедрен на ОАО «БЕЛАЗ» – управляющей компанией холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ». Разработаны технологические рекомендации № ТР 1/01.07 – 2014 по нанесению антифрикционных покрытий на высоконагружен-

ные втулки сателлитов дифференциалов гидродинамической трансмиссии карьерного самосвала БелАЗ.

3. Показана возможность использования разработанного способа формирования антифрикционного покрытия из порошковых материалов, содержащих в своем составе наноразмерные добавки карбида титана TiC и оксида алюминия  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , повышающих износостойкость, микротвердость при одновременном снижении коэффициента трения по сравнению с немодифицированным покрытием, в ремонтных подразделениях машиностроительной отрасли (ЭРУП «Центр механизации путевых работ Белорусской железной дороги»).

### **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ** **Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах,** **включенных в перечень ВАК**

1—А. Кинетика формирования контакта между порошковыми покрытиями и основой / К.Е. Белявин, И.А. Сосновский, Ю.Н. Гафо, М.А. Белоцерковский, А.А. Курилёнок // *Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы*. Сер. 6, Тэхніка. – 2013. – № 2. – С. 58–63.

2—А. Индукционная центробежная наплавка шихты на основе порошков оловянистой бронзы с добавкой тонкодисперстного бемита / И.А. Сосновский, М.А. Белоцерковский, А.А. Курилёнок, О.О. Кузнецик, Е.Г. Григорьев // *Сварочное производство*. – 2015. – № 9 (970). – С. 31–35.

3—А. Моделирование процессов индукционной наплавки порошковых покрытий, содержащих наноразмерные модификаторы / М.А. Белоцерковский, И.А. Сосновский, А.А. Курилёнок, О.О. Кузнецик // *Веснік Полацкага дзяржаўнага ўніверсітэта*. Сер. В, Прамысловасць. Прыкладная навукі. – 2016. – № 3. – С. 66–74.

4—А. Белоцерковский, М.А. Теоретический анализ процесса индукционной центробежной наплавки покрытий с наноразмерными модификаторами / М.А. Белоцерковский, А.А. Курилёнок, И.А. Сосновский // *Механика машин, механизмов и материалов*. – 2016. – № 2 (35). – С. 68–74.

5—А. Sosnovskiy, I.A. Induction centrifugal surfacing of the charge based on tin bronze powders with the addition of finely dispersed boehmite / I.A. Sosnovskiy, A.A. Kurilenok, M.A. Belotserkovskiy, O.O. Kuznechik, E.G. Grigorev // *Welding international*. – 2016. – Vol. 30, № 9. – P. 736–739.

6—А. Белоцерковский, М.А. Центробежная наплавка антифрикционных покрытий с наноразмерными наполнителями / М.А. Белоцерковский, А.А. Курилёнок, И.А. Сосновский // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2016. – № 12 (144). – С. 19–23.

7—А. Курилёнок, А.А. Оптимизация процесса центробежной индукционной наплавки антифрикционных покрытий методом математического планирования эксперимента / А.А. Курилёнок, М.А. Белоцерковский // *Механика машин, механизмов и материалов*. – 2017. – № 2 (39). – С. 28–33.

8—А. Курилёнок, А.А. Оценка динамического воздействия на наноразмерные частицы в процессе центробежной наплавки порошковых шихт / А.А. Курилё-

нок, М.А. Белоцерковский // Механика машин, механизмов и материалов. – 2018. – № 1 (42). – С. 36–43.

**Статьи, опубликованные в рецензируемых научных сборниках, включенных в перечень ВАК**

9–А. Технология нанесения порошковых шихт на основе медных сплавов, модифицированных нанодисперсными компонентами / И.А. Сосновский, К.Е. Белявин, А.А. Курилёнок, О.О. Кузничик // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси; редкол. : А.А. Дюжев (председатель) [и др.]. – Минск, 2013. – Вып. 2. – С. 428–432.

10–А. Белоцерковский, М.А. Технология нанесения антифрикционных покрытий повышенной износостойкости с использованием наномодификаторов в виде оксидных компонентов / М.А. Белоцерковский, А.А. Курилёнок, И.А. Сосновский // Современные методы и технологии создания и обработки материалов / ФТИ НАН Беларуси; редкол.: С.А. Астапчик (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2014. – Кн.2. – С. 185–189.

11–А. Особенности индукционной наплавки антифрикционных порошковых шихт с добавками наноразмерных компонентов / М.А. Белоцерковский, А.А. Курилёнок, И.А. Сосновский, А.Е. Черепко // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко (председатель) [и др.]. – Минск, 2014. – Вып. 3. – С. 374–376.

12–А. Центробежная индукционная наплавка антифрикционных покрытий из порошковых шихт на основе медных сплавов, модифицированных наноразмерными корундом и карбидом титана / А.А. Курилёнок, А.И. Комаров, В.И. Комарова, И.А. Сосновский // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко (председатель) [и др.]. – Минск, 2015. – Вып. 4. – С. 347–352.

13–А. Параметрическая стабилизация термических режимов в технологии центробежной индукционной наплавки покрытий / И.А. Сосновский, А.А. Курилёнок, К.Е. Белявин, О.О. Кузничик // Современные методы и технологии создания и обработки материалов / ФТИ НАН Беларуси; редкол.: С.А. Астапчик (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2016. – Кн.2. – С. 252–261.

14–А. Моделирование и реализация процессов электротермической наплавки металломатричных композитов / И.А. Сосновский, М.А. Белоцерковский, А.А. Курилёнок, К.Е. Белявин, О.О. Кузничик // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко (председатель) [и др.]. – Минск, 2016. – Вып. 5. – С. 357–364.

15–А. Индукционная наплавка покрытий из металломатричных композитов с использованием системы параметрической стабилизации технологических режимов / И.А. Сосновский, М.А. Белоцерковский, А.А. Курилёнок, О.О. Кузничик // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объединенный

институт машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко (председатель) [и др.]. – Минск, 2017. – Вып. 6. – С. 382–387.

### **Статьи в сборниках материалов научных конференций**

16–А. Особенности определения навесок порошка для получения покрытий / И.А. Сосновский, К.Е. Белявин, Ю.Н. Гафо, А.А. Курилёнок // Машиностроение и техносфера XXI века: сб. тр. XX Междунар. науч.-технич. конф., г. Севастополь 16–21 сент. 2013 г.: в 3 т. / ДонНТУ. – Донецк, 2013. – Т. 3. – С. 35–39.

17–А. Особенности технологии создания двухслойных антифрикционных изделий ходовых сопряжений рабочих органов путевых машин / И.А. Сосновский, М.А. Белоцерковский, А.А. Курилёнок, И.И. Грудько, И.П. Трембицкий, А.Ф. Климович // Новые материалы и технологии в машиностроении: сб. науч. тр. / БГИТА; под общ. ред. Е.А. Памфилова. – Брянск, 2014. – Вып. 20. – С. 88–92.

18–А. Белоцерковский, М.А. Разработка метода индукционной наплавки антифрикционных покрытий повышенной износостойкости с использованием наноразмерных компонентов наплавке / М.А. Белоцерковский, А.А. Курилёнок, И.А. Сосновский // Перспективные материалы и технологии: сб. материалов Междунар. симпозиума, Витебск, 27–29 мая 2015 г. / УО «ВГТУ». – Витебск, 2015. – С. 288–290.

19–А. Курилёнок, А.А. Моделирование динамического воздействия процесса центробежной наплавки порошковых шихт на наноразмерные частицы / А.А. Курилёнок // Инновационные технологии в машиностроении: материалы Междунар. науч.-технич. конф., Новополоцк, 19–20 апр. 2018 г. / Полоц. гос. ун-т; под. ред. чл.-корр., д-ра техн. наук, проф. В.К. Шелега; д-ра техн. наук, проф. Н.Н. Попок. – Новополоцк, 2018. – С. 232–235.

20–А. Структурообразование и свойство покрытий из металломатричных композитов на основе медных сплавов, модифицированных нано-размерными корундом и карбидом кремния / А.И. Комаров, И.А. Сосновский, Д.В. Орда, А.А. Курилёнок, Д.О. Искадарова // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка: материалы 13-й Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 16–18 мая 2018 г. / Ин-т порошковой металлургии НАН Беларуси; редкол.: А.Ф. Ильющенко (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2018. – С. 299–303.

21–А. Белоцерковский, М.А. Технология формирования антифрикционных покрытий с наноразмерными компонентами центробежной наплавкой / М.А. Белоцерковский, А.А. Курилёнок // Технология. Оборудование. Качество: сб. докл. Междунар. симпозиума, Минск, 29 мая – 1 июня 2018 г. / БНТУ; редкол.: С.В. Харитончик (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2018. – С. 128–130.

22–А. Sasnouski I. Kinetics of the melting front movement in process of centrifugal induction surfacing of powder material with nanoscale modifiers / I. Sasnouski, A. Kurylionak // Journal of Physics: Conference Series. ANNIC 2017. – 2018. –Vol. 987, 012020.

### **Патенты и заявки**

23–А. Устройство для нанесения покрытий из металлических порошков на внутренние поверхности деталей: пат. 8682 Респ. Беларусь, МПК В22

F7/02 (2012) / И.А. Сосновский, Ю.Н. Гафо, В.В. Жигилей, А.А. Курилёнок ; заявитель ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси» – № u20120284; заявл. 21.03.2012; опубл. 30.10.2012 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. № 5. – С. 192.

24–А. Способ нанесения антифрикционного покрытия на внутреннюю поверхность детали типа тела вращения: пат. 21351 Респ. Беларусь, МПК В22 F7/04 (2014) / М.А. Белоцерковский, И.А. Сосновский, А.А. Курилёнок, С.В. Бесараб, А.В. Сосновский, О.О. Кузнечик, А.Е. Черепко ; заявитель ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси» – № a20140490; заявл. 17.09.2014; опубл. 30.10.2017 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2017. № 5. – С. 81.

25–А. Способ формирования антифрикционного покрытия из порошковых материалов: Евразийская заявка на изобретение № 201600519 / М.А. Белоцерковский, А.А. Курилёнок, И.А. Сосновский, С.А. Шишко, А.С. Лисичик; заявитель ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси»; заявл. 27.06.2016.

## РЭЗЮМЭ

Курылёнак Арцём Аляксандравіч

**ТЭХНАЛОГІЯ АТРЫМАННЯ АНТЫФРЫКЦЫЙНЫХ ПАКРЫЦЦЯЎ  
ЦЭНТРАБЕЖНАЙ ІНДУКЦЫЙНАЙ НАПЛАЎКАЙ ПАРАШКОЎ  
АЛАВЯНІСТАЯ БРОНЗЫ З НАНАРАЗМЕРНЫМІ ДАБАЎКАМІ  
КАРБІДУ ТЫТАНА І АКСІДУ АЛЮМІНІЯ**

**Ключавыя словы:** цэнтрабежная індукцыйная наплаўка, парашковая шыхта, нанаразмерная дабаўка, зносастойкія пакрыцці, медныя сплавы, карбід тытану, аксід алюмінію, структураўтварэнне, біметалічныя дэталі.

**Мэта даследавання:** распрацоўка тэхналогіі атрымання антыфрыкцыйных пакрыццяў цэнтрабежнай індукцыйнай наплаўкай парашкоў алавяністай бронзы з нанаразмернымі дабаўкамі карбіду тытана і аксіду алюмінія для дэталей вузлоў трэння машын.

**Метады даследавання і выкарыстаная апаратура:** кантроль тэмпературы (інфрачырвоны піраметр TemPro-2200), стандартныя метадыкі ацэнкі фізіка-механічных уласцівасцяў наплаўленых пакрыццяў; метады рэнтгена-структурнага, металаграфічнага і дыяметрычнага аналізу.

**Атрыманая вынікі і іх навізна:** вынікі даследавання дынамічнага ўздзеяння расплаву на часціцы мадыфікатара ў працэсе фарміравання пакрыццяў з нанаразмернымі дабаўкамі цэнтрабежнай індукцыйнай наплаўкай, ад тэхналагічных параметраў працэсу і матэрыялаў пакрыцця. Вынікі колькаснага аналізу, якія дазволілі ўсталяваць працягласць праходжання рэакцыі тэрмічнага раскладання гідраксіду алюмінія ў залежнасці ад тэхналагічных параметраў цэнтрабежнай індукцыйнай наплаўкі. Даследавана атрыманне нанаразмерных часціц аксіду алюмінія з мікраразмерных дабавак гідраксіду алюмінія, за кошт іх тэрмічнага раскладання непасрэдна пры цэнтрабежнай індукцыйнай наплаўцы антыфрыкцыйнага пакрыцця. Даследаван ўплыў нанаразмернай дабаўкі карбіду тытана і аксіду алюмінія ў складзе шыхты алавяністай бронзы, пры цэнтрабежнай індукцыйнай наплаўцы пакрыцця, на мікрацвёрдасць, зносастойлівасць і каэфіцыента трэння пакрыццяў.

**Рэкамендацыі па выкарыстанні:** вынікі даследавання могуць быць выкарыстаны пры вытворчасці вузлоў трэння мабільнай тэхнікі і тэхналагічнага абсталявання; вынікі працы ўкаранёны ў вытворчасць на ААТ «БЕЛАЗ» – кіруючай кампаніяй холдынгу «БЕЛАЗ-ХОЛДЫНГ».

**Галіна выкарыстання:** прамысловыя прадпрыемствы, якія займаюцца пытаннямі вырабу, рамонтву вузлоў трэння мабільнай тэхнікі і тэхналагічнага абсталявання.

## РЕЗЮМЕ

Курилёнок Артём Александрович

**ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ  
ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКОЙ ПОРОШКОВ  
ОЛОВЯНИСТОЙ БРОНЗЫ С НАНОРАЗМЕРНЫМИ ДОБАВКАМИ  
КАРБИДА ТИТАНА И ОКСИДА АЛЮМИНИЯ**

**Ключевые слова:** центробежная индукционная наплавка, порошковая шихта, наноразмерная добавка, износостойкие покрытия, медные сплавы, карбид титана, оксид алюминия, структурообразование, биметаллические детали.

**Цель исследования:** разработка технологии получения антифрикционных покрытий центробежной индукционной наплавкой порошков оловянистой бронзы с наноразмерными добавками карбида титана и оксида алюминия для деталей узлов трения машин.

**Методы исследования и использованная аппаратура:** контроль температуры (инфракрасный пирометр TemPro-2200), стандартные методики оценки физико-механических свойств наплавленных покрытий; методы рентгеноструктурного, металлографического и дюрOMETрического анализов.

**Полученные результаты и их новизна:** результаты исследования динамического воздействия расплава на частицы модификатора в процессе формирования покрытий с наноразмерными добавками центробежной индукционной наплавкой, от технологических параметров процесса и материалов покрытия. Результаты численного анализа, позволившие установить длительность протекания реакции термического разложения гидроксида алюминия в зависимости от технологических параметров центробежной индукционной наплавки. Исследовано получение наноразмерных частиц оксида алюминия из микроразмерных добавок гидроксида алюминия, за счет их термического разложения непосредственно при центробежной индукционной наплавке антифрикционного покрытия. Исследовано влияние наноразмерной добавки карбида титана и оксида алюминия в составе шихты оловянистой бронзы, при центробежной индукционной наплавке покрытия, на микротвердость, износостойкость и коэффициент трения покрытий.

**Рекомендации по использованию:** результаты исследования могут быть использованы при производстве узлов трения мобильной техники и технологического оборудования; результаты работы внедрены в производство на ОАО «БЕЛАЗ» – управляющей компанией холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ».

**Область применения:** промышленные предприятия, занимающиеся вопросами изготовления, ремонта узлов трения мобильной техники и технологического оборудования.



## SUMMARY

**Kurilyonok Artem Aleksandrovich**

### **THE TECHNOLOGY OF OBTAINING ANTI-FRICTION COATINGS CENTRIFUGAL INDUCTION WELDING TIN BRONZE POWDERS WITH NANOSIZED ADDITIVES OF TITANIUM CARBIDE AND ALUMINUM OXIDE**

**Keyword:** centrifugal induction welding, powder charge, nanoscale additive, antiwear coating, copper alloy, titanium carbide, aluminum oxide, structure formation, bimetallic part.

**Purpose of research:** development of technology for production of antifriction coatings of centrifugal induction surfacing of tin bronze powders with nanoscale additives of titanium carbide and aluminum oxide for parts of friction units of machines.

**Research methods and equipment used:** temperature control (infrared pyrometer TemPro-2200), standard methods of evaluation of physical and mechanical properties of deposited coatings; methods of x-ray diffraction, metallographic and durometric analysis.

**The results and their novelty:** the results of the study of the dynamic effect of the melt on the modifier particles during the formation of coatings with nanosized additives by centrifugal induction surfacing, on the technological parameters of the process and coating materials. The results of the numerical analysis allowed to establish the duration of the thermal decomposition reaction of aluminum hydroxide depending on the technological parameters of the centrifugal induction surfacing. The production of nanoscale aluminum oxide particles from micro-sized aluminum hydroxide additives due to their thermal decomposition directly at the centrifugal induction surfacing of antifriction coating is investigated. The effect of nanoscale additive of titanium carbide and aluminum oxide in the composition of tin bronze charge, in centrifugal induction surfacing of the coating, on the microhardness, wear resistance and friction coefficient of the coatings is studied.

**Recommendations for the use of:** the results of the study can be used in the production of friction units of mobile equipment and technological equipment; the results of the work introduced in the production of OJSC "BELAZ" – management company of holding "BELAZ-HOLDING".

**Application:** industrial enterprises engaged in the manufacture, repair of friction units of mobile equipment and technological equipment.